

Atomová fyzika

Atomová fyzika

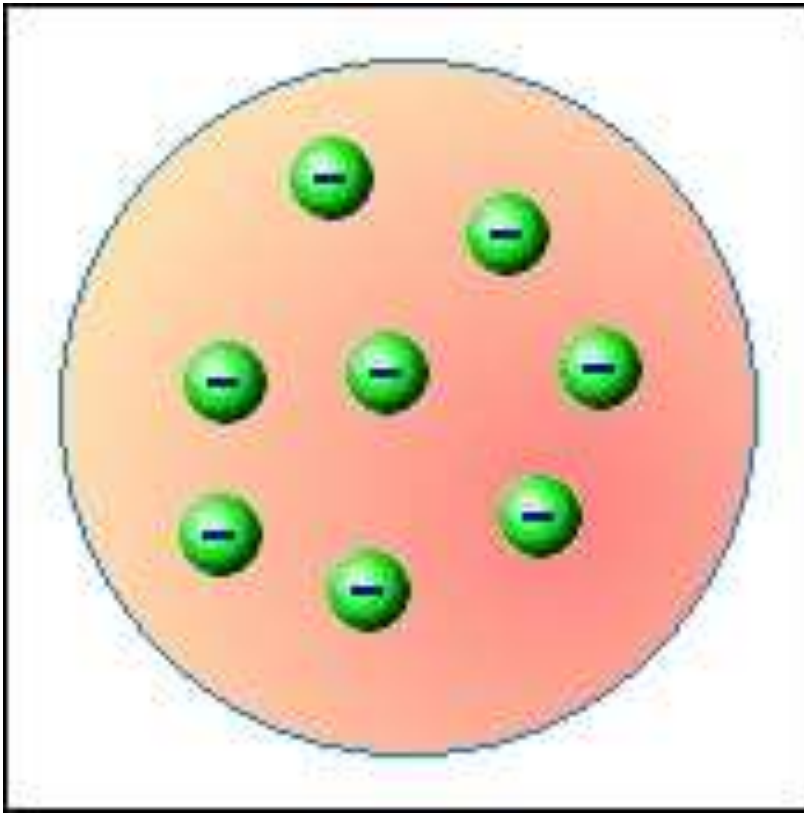
- Atomovou fyzikou rozumíme fyziku elektronového obalu atomu.
- Někteří antičtí filozofové předpokládali, že látku není možné dělit donekonečna a že musí existovat nedělitelné částice – atomy.
- Byla to ovšem pouhá spekulace nepodložená jakýmkoli pozorováním.

Atomová fyzika

- Již jednoduchá představa atomu jako malé kuličky bez vnitřní struktury se ukázala velmi cennou, neboť již bylo možno vysvětlit např. co je to teplo.
- Roku 1897 objevil sir Thomson při experimentech s katodovým zářením elektron.
- Atom tedy není nedělitelný a musí mít vnitřní strukturu.

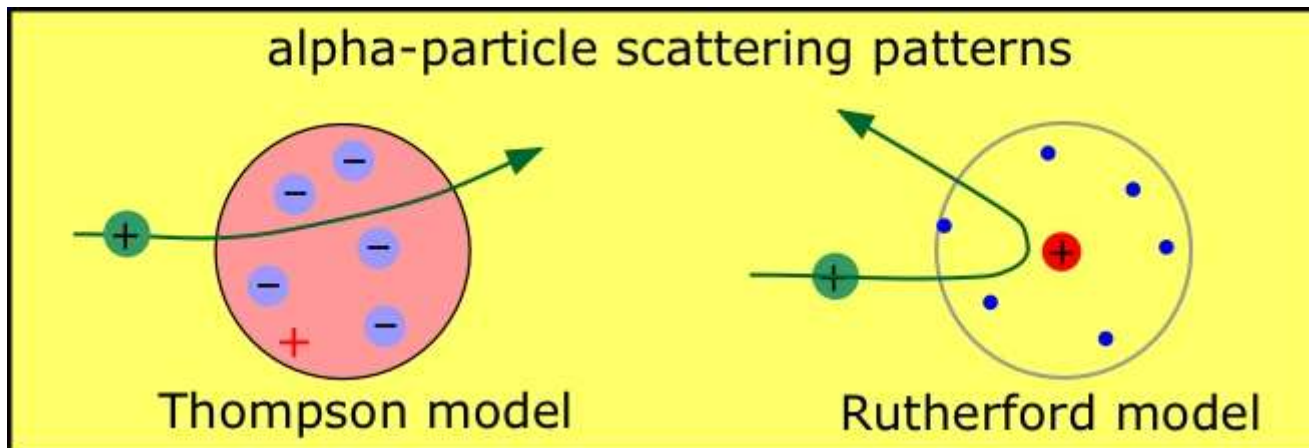
Thomsonův pudingový model atomu

- Thomson si atom představoval opět jako malou kuličku kladně nabitě hmoty, v níž jsou rozptýleny jako rozinky v pudingu záporně nabité elektrony.



Ověření

- K ověření tohoto modelu navrhl E. Rutherford experiment, který spočíval v ostřelování tenké zlaté fólie částicemi alfa, tj. jádry helia.
- A je-li atom opravdu kulička kladně nabitě hmoty, tak částice α příliš neovlivní. (Střední odchylka α částic od přímého směru byla vypočtena na cca 1° .)

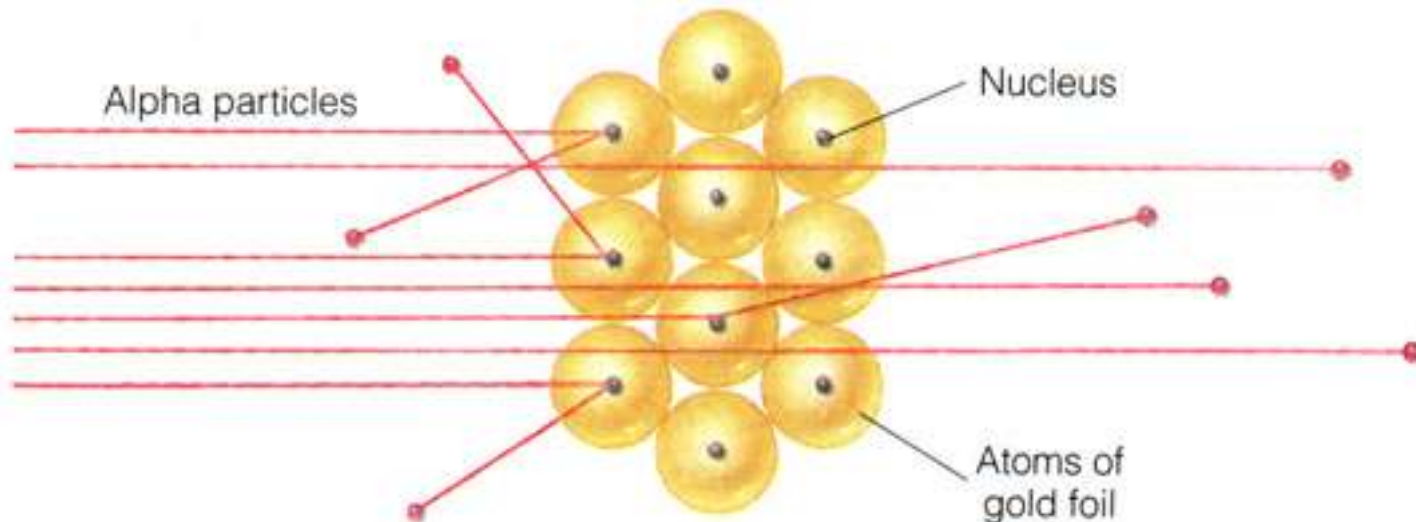


Ověření

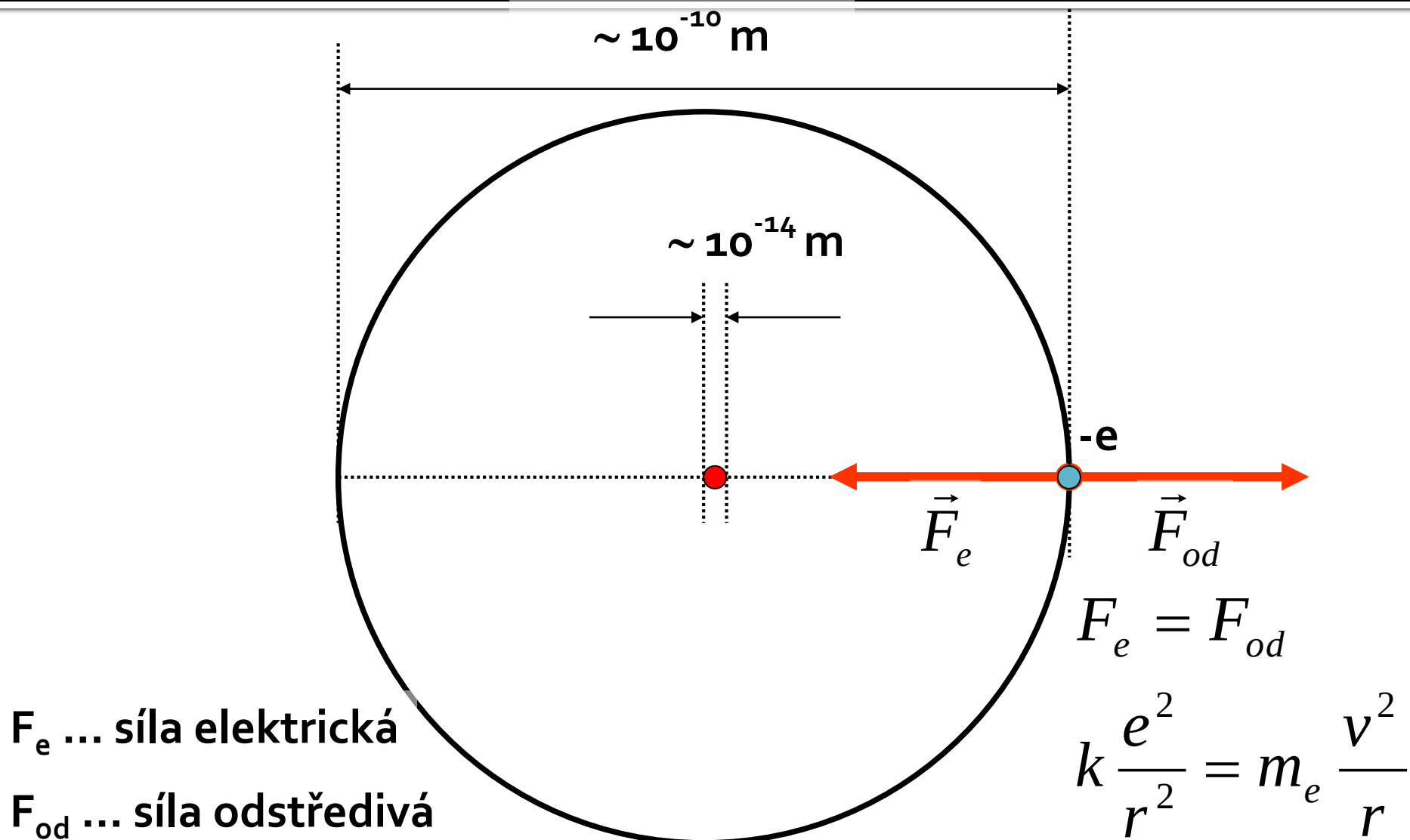
- Když roku 1909 H. Geiger a E. Marsden experiment provedli, tak zjistili, že většina α částic opravdu fólií prochází bez výraznějších odchylek.
- Ale asi jedna částice z 8000 se odchýlila o úhly větší než 90° , přičemž našli dokonce takové, které se odrazily zpět.
- Tyto částice musely narazit na malý kompaktní objekt asi 10000x menší než celý atom, který však obsahuje prakticky veškerou hmotu atomu.
- [Simulace](#)

Objev jádra atomu

- Tak bylo objeveno atomové jádro.
 - [Rutherfordův experiment](#)
- Podle Rutherforda připomíná atom planetární soustavu: malé kladně nabitě, ale velmi hmotné jádro, kolem něhož ve velkých vzdálenostech krouží záporně nabitě a málo hmotné elektrony.



Planetární model atomu



Planetární model atomu

- Bohužel brzo se objevily vážné námitky:
- Jestliže se elektricky nabitá částice pohybuje se zrychlením, pak podle klasické fyziky vyzařuje elektromagnetické vlnění a ztrácí energii.
- Elektron by se tak měl po spirále blížit k jádru a po 10^{-16} s na něj dopadnout.

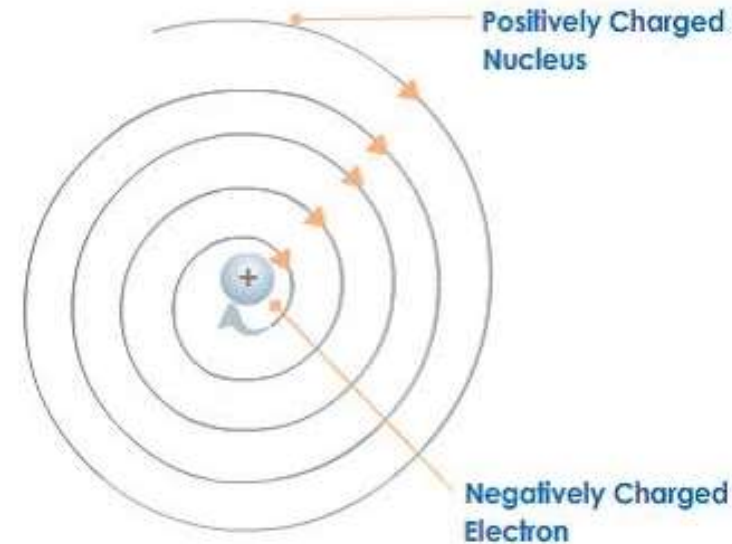
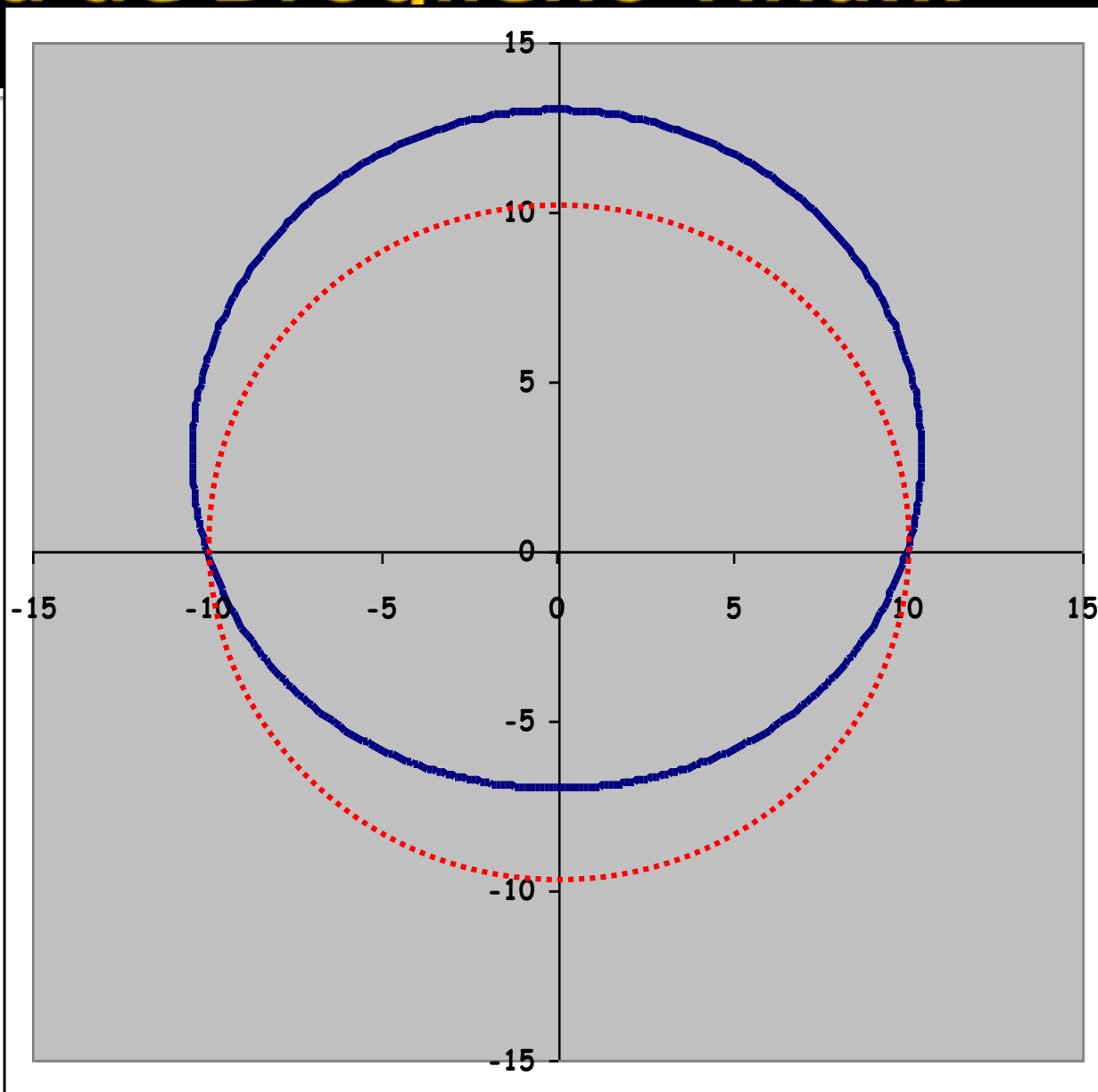


Diagram to Show How an Energy Losing Electron Could Fall into the Nucleus

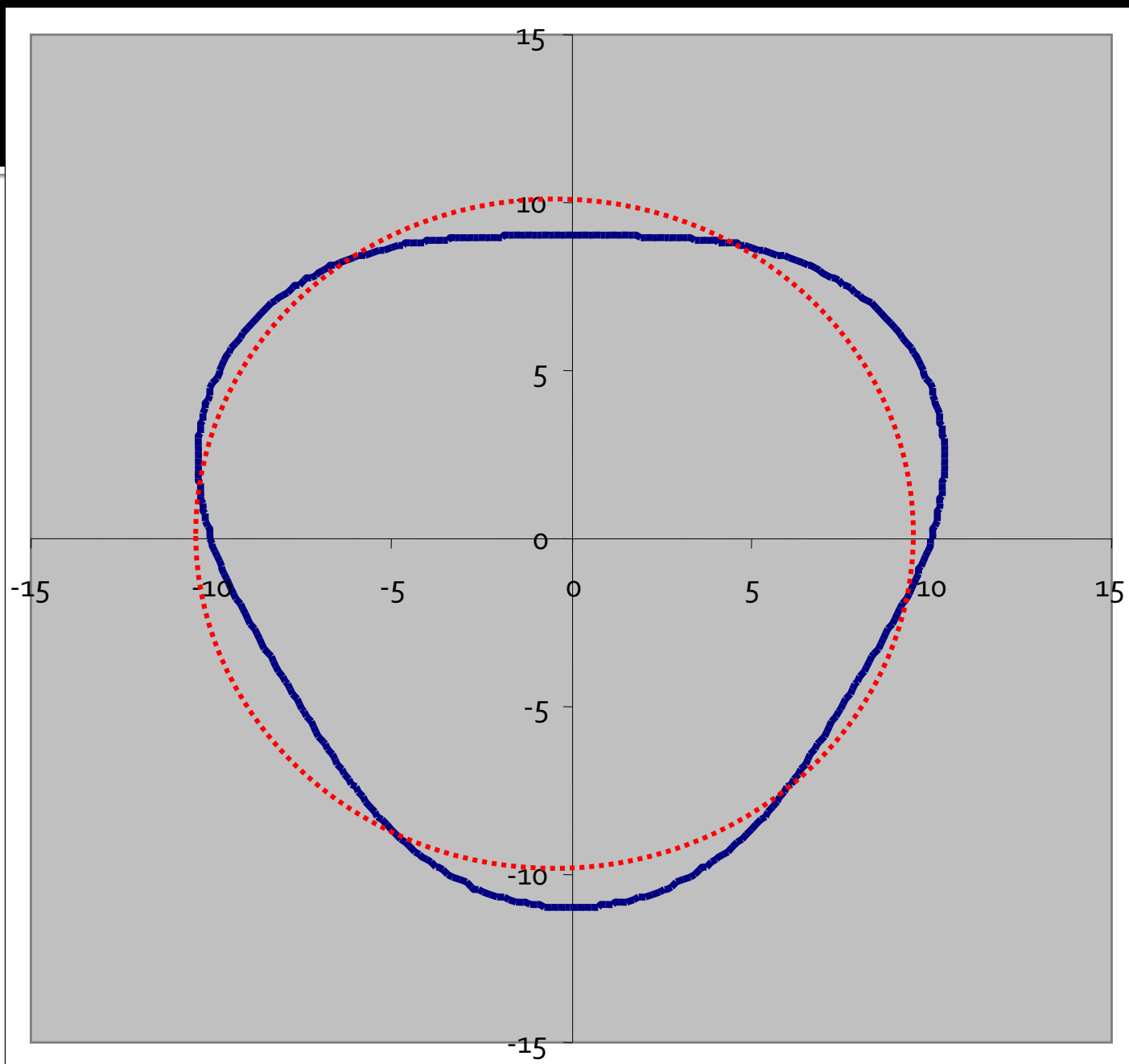
Řešení

- Atomy by tedy nebyly stabilní a neměly by existovat.
- Problém se pokusil vyřešit N. Bohr (1913), když na atom vodíku aplikoval podmínku, která v klasické fyzice nemá obdoby.
- Předpokládal, že elektron se může pohybovat pouze v takových vzdálenostech od jádra, že se obvod jeho kruhové trajektorie rovná celočíselnému násobku de Broglieho vlnové délky.
- Tzn. že na kružnici připadne právě:

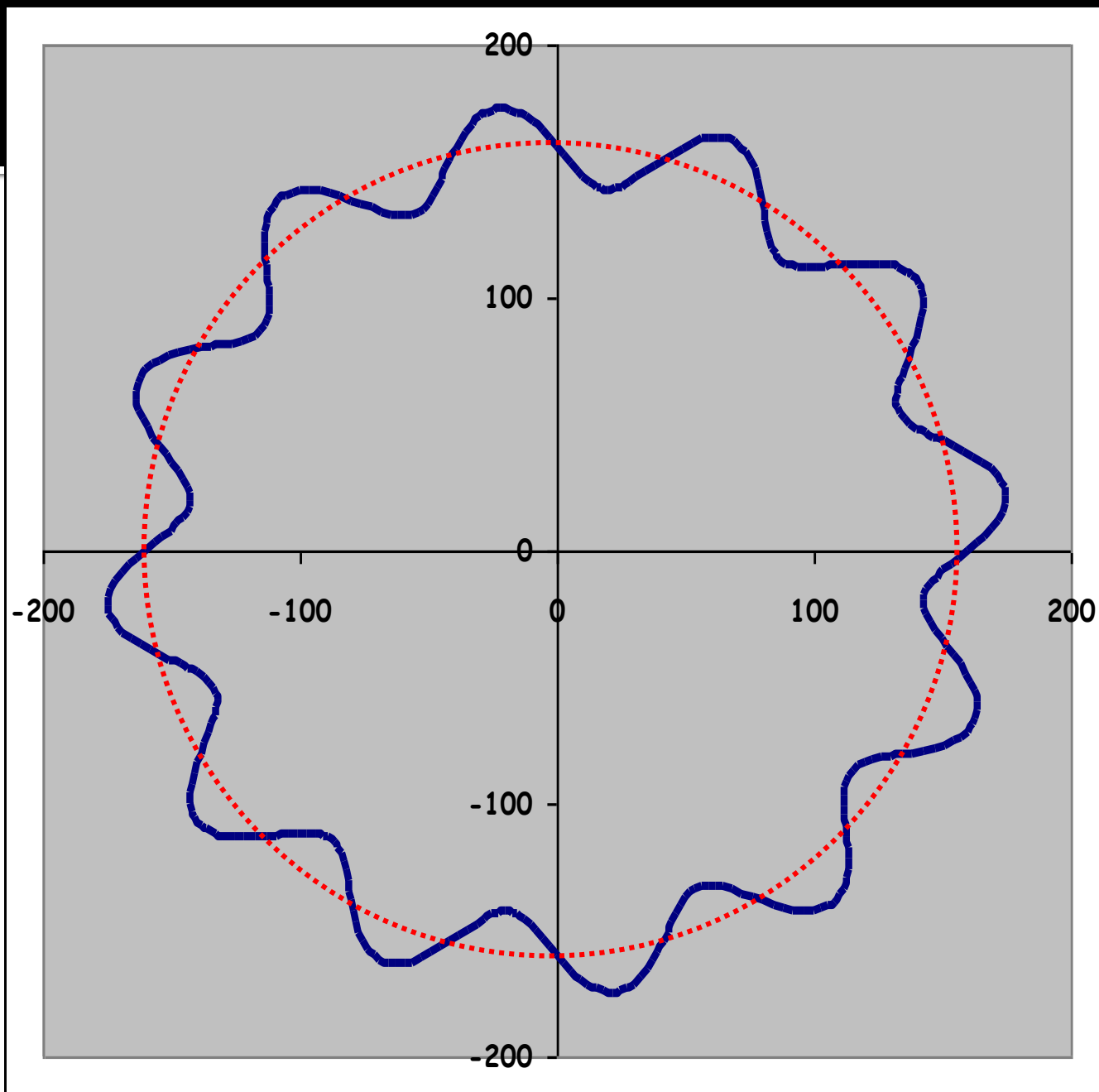
jedna de Broglieho vlna...



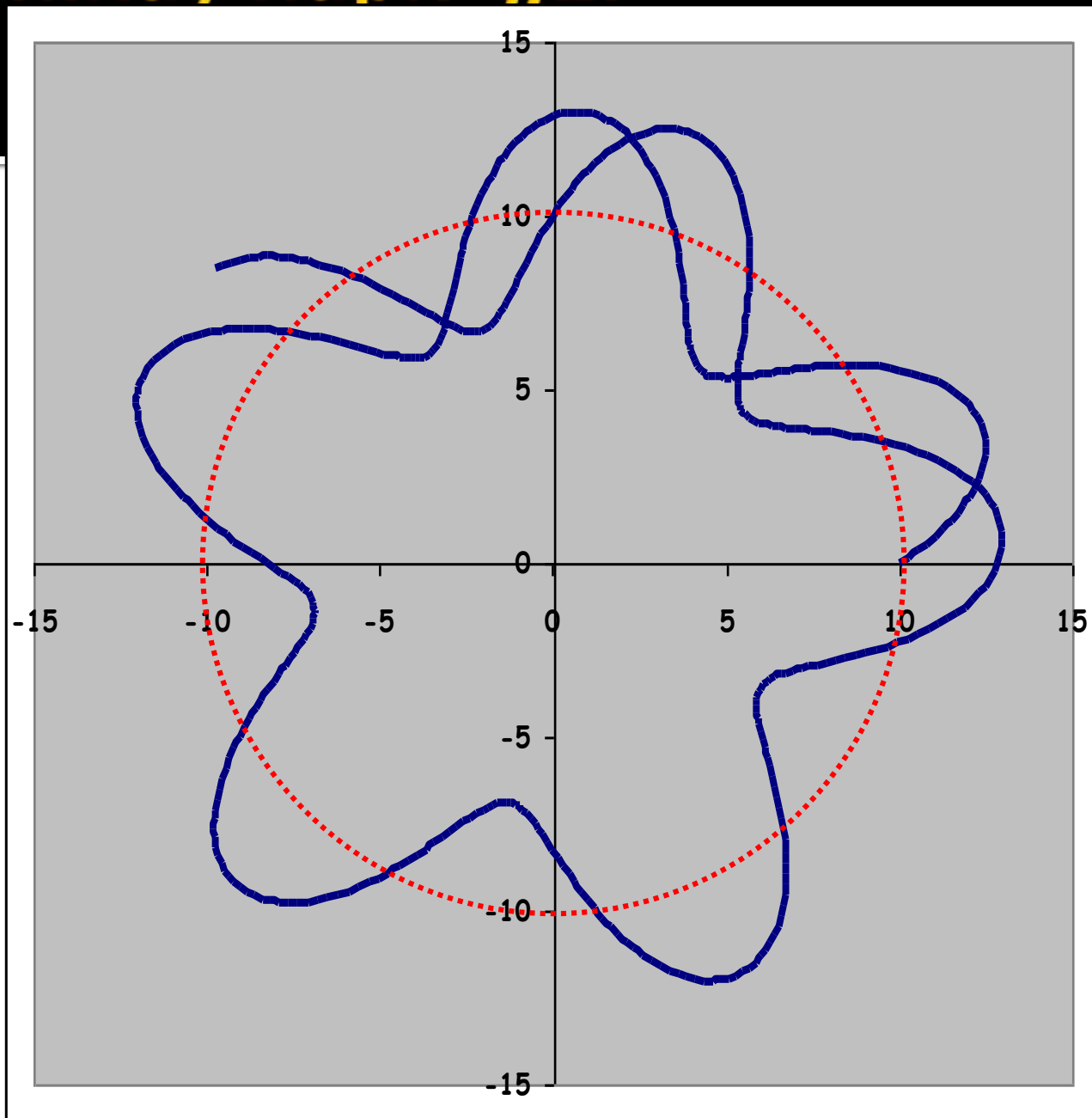
nebo tři



dvanáct

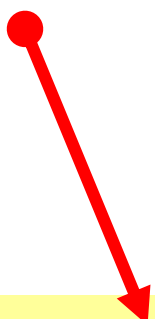


...ale nikdy např. 5,2.



Kvantování v atomu

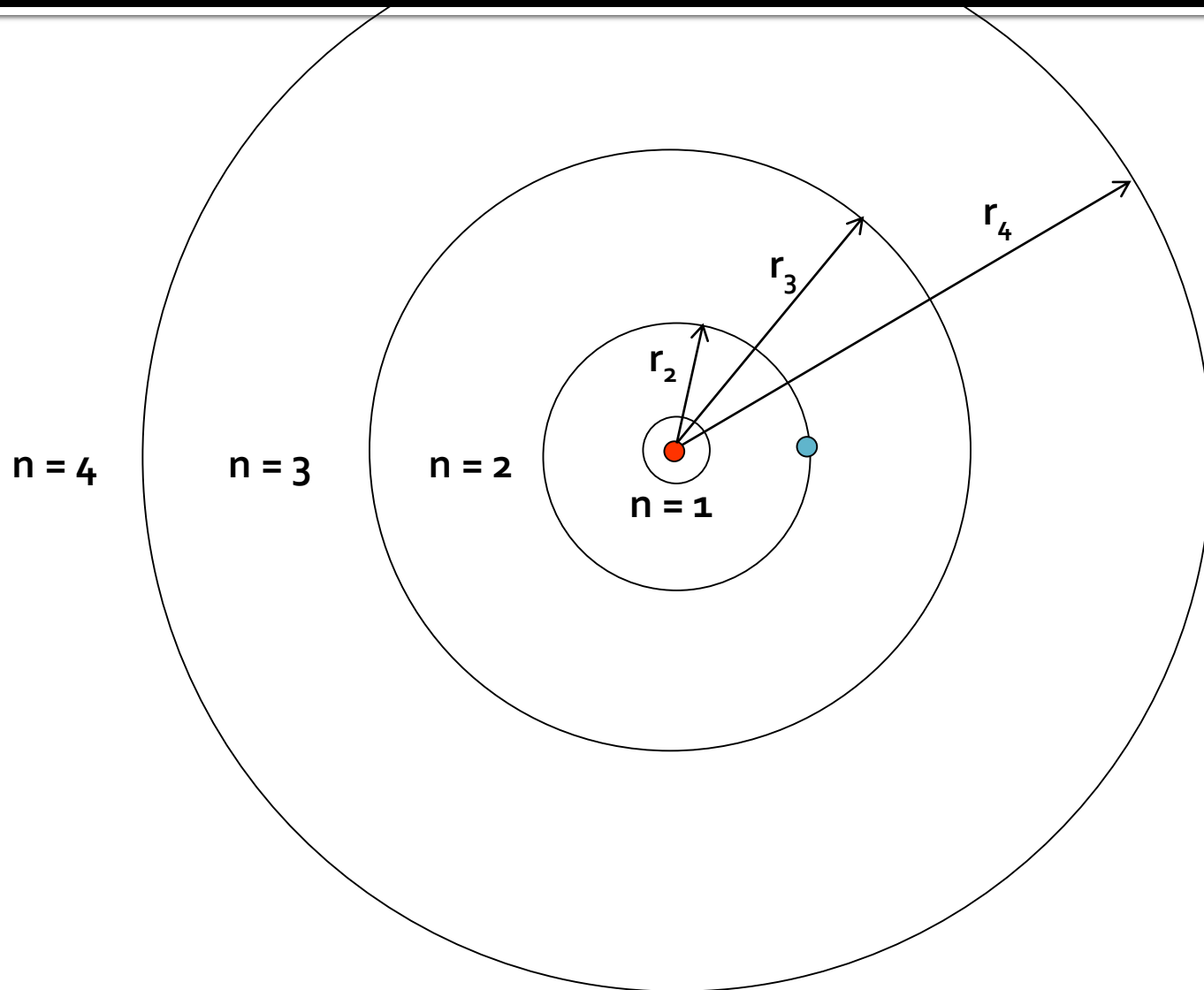
- Poloměr kruhové trajektorie elektronu pak nabývá pouze hodnot přesně daných, tzn. je kvantován.


$$r_n = n^2 a_0$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Kvantování v atomu



Důsledky

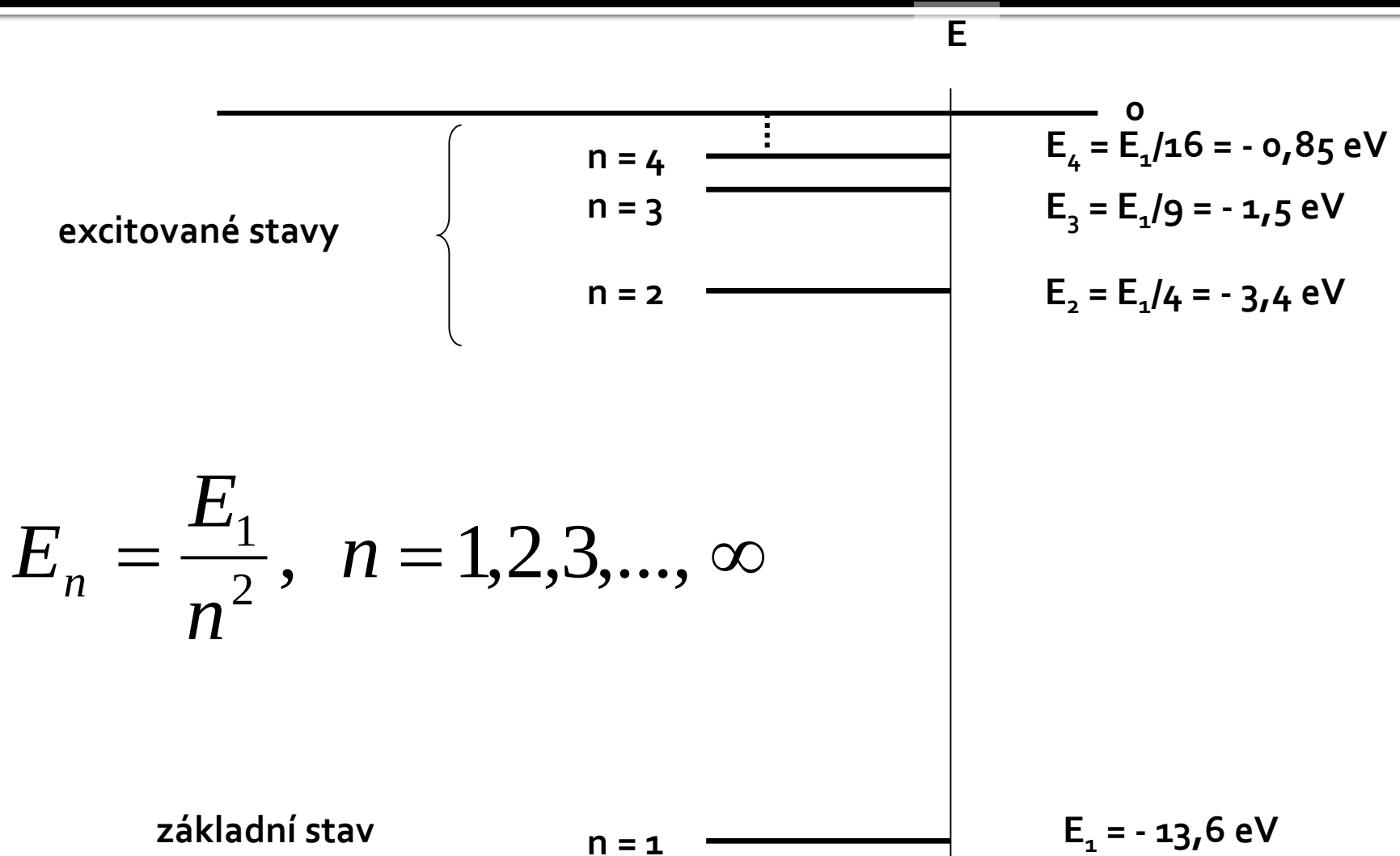
- V důsledku toho nemůže energie elektronu nabývat jakýchkoli hodnot – i ona je kvantována.
- Mluvíme o tom, že elektron je na energetických hladinách.

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

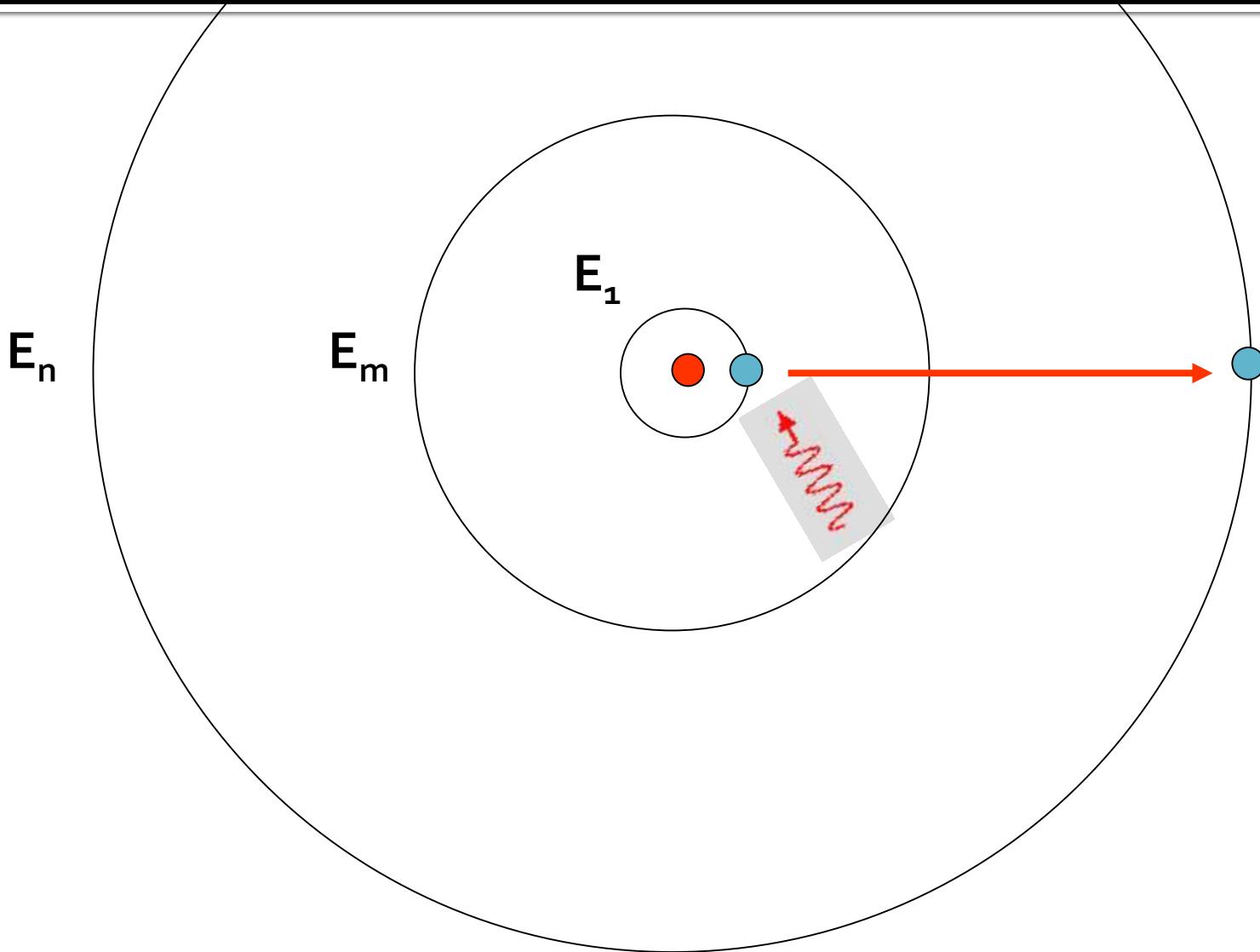
Energetické hladiny elektronu atomu vodíku



Excitace

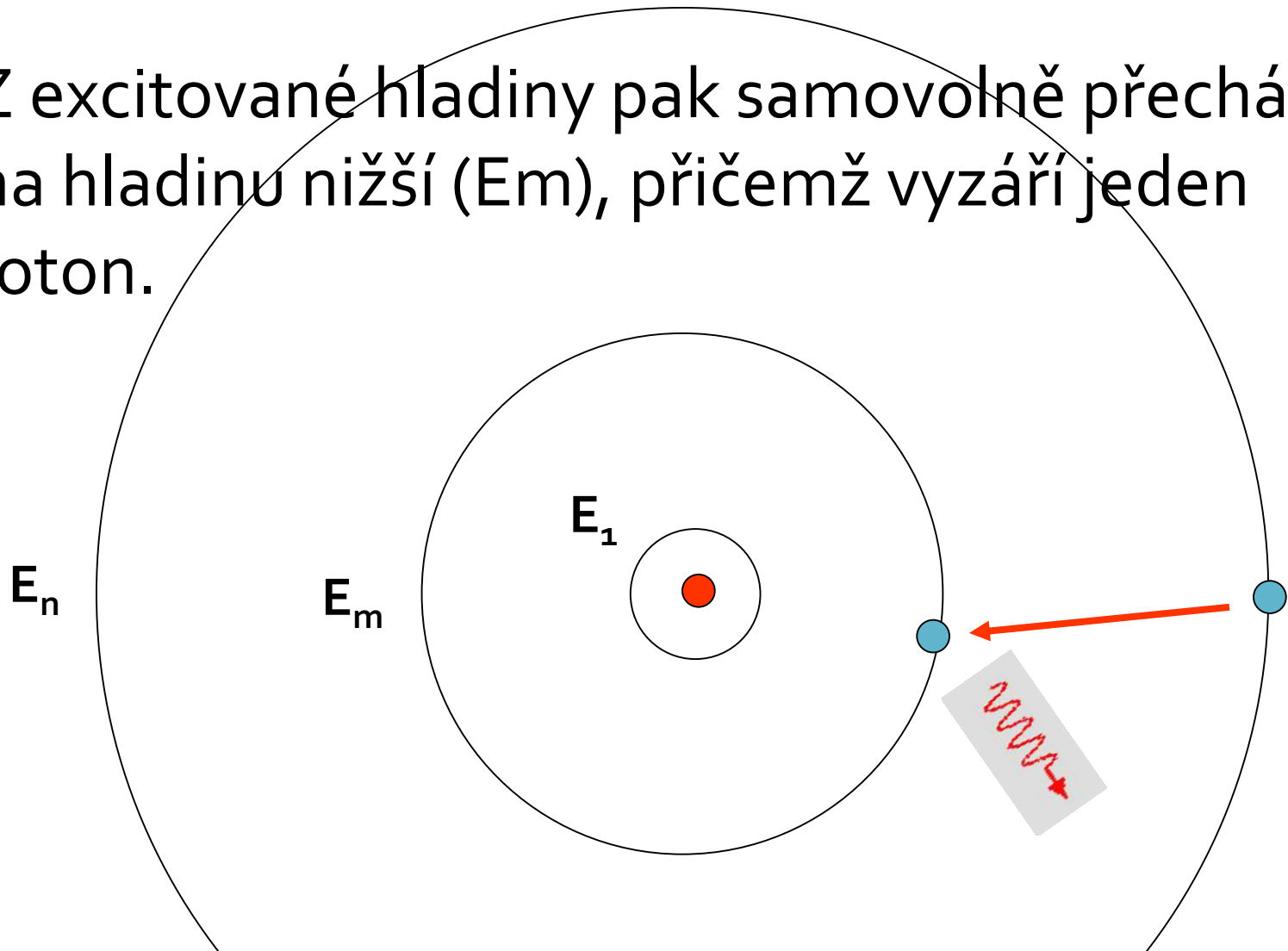
- Elektron může existovat neomezeně dlouho na první energetické hladině, aniž by vyzařoval energii.
- Jestliže však do atomu narazí jiný atom anebo foton, přijme energii a dostane se na vyšší energetickou hladinu (E_n).

excitace atomu H fotonem



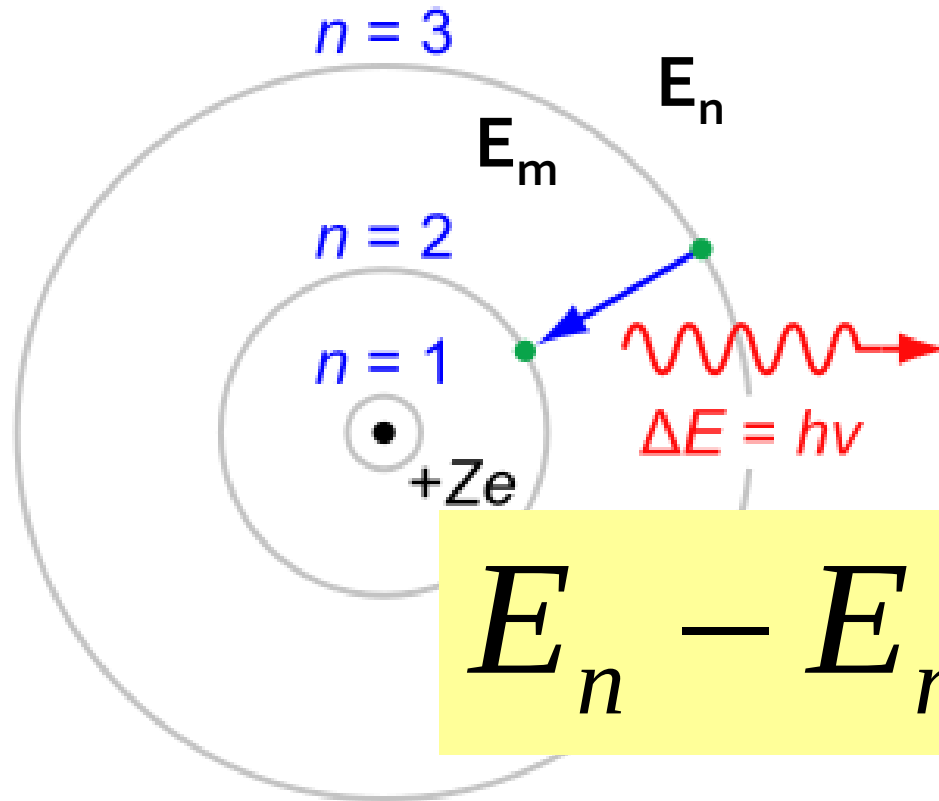
Excitace

- Z excitované hladiny pak samovolně přechází na hladinu nižší (E_m), přičemž vyzáří jeden foton.



Vyzářený foton

- Energie fotonu se pak rovná rozdílu energií mezi těmito hladinami.



$$E_n - E_m = hf$$

Limity tohoto modelu

- N. Bohrovi se alespoň částečně úspěšně podařilo popsat pouze nejjednodušší atom – atom vodíku.
- Na složitější atomy s více elektrony je nutno aplikovat kvantovou mechaniku.
- Kvantově mechanický přístup k atomu znamená sestavit Schrödingerovu rovnici a vyřešit ji.

Kvantová teorie pro vodík

- Bohužel Schrödingerova rovnice je již pro atom H nepříjemně komplikovaná.

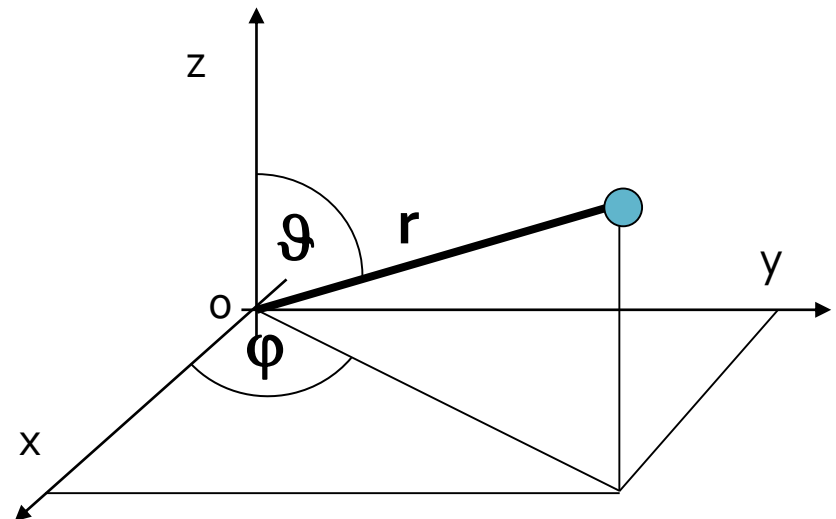
$$\sin^2 \vartheta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \sin \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{2mr^2 \sin^2 \vartheta}{\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + E \right) \psi = 0$$

polární soustava souřadnic:

r ... vzdálenost od o

φ ... „zeměpisná délka“

ϑ ... „zeměpisná šířka“



Vyzařování energie z atomu vodíku

- Přechází-li elektron z n -té na m -tou energetickou ($n > m$), tak vyzáří jeden foton, jehož frekvence splňuje tuto podmínku:

$$E_n - E_m = hf$$

Vyzařování energie z atomu vodíku

- Po úpravě:

$$\frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{m^2} = hf$$


$$f = -\frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) - \frac{E_1}{h} = \underbrace{R_f}_{\text{Rydbergova frekvence}} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

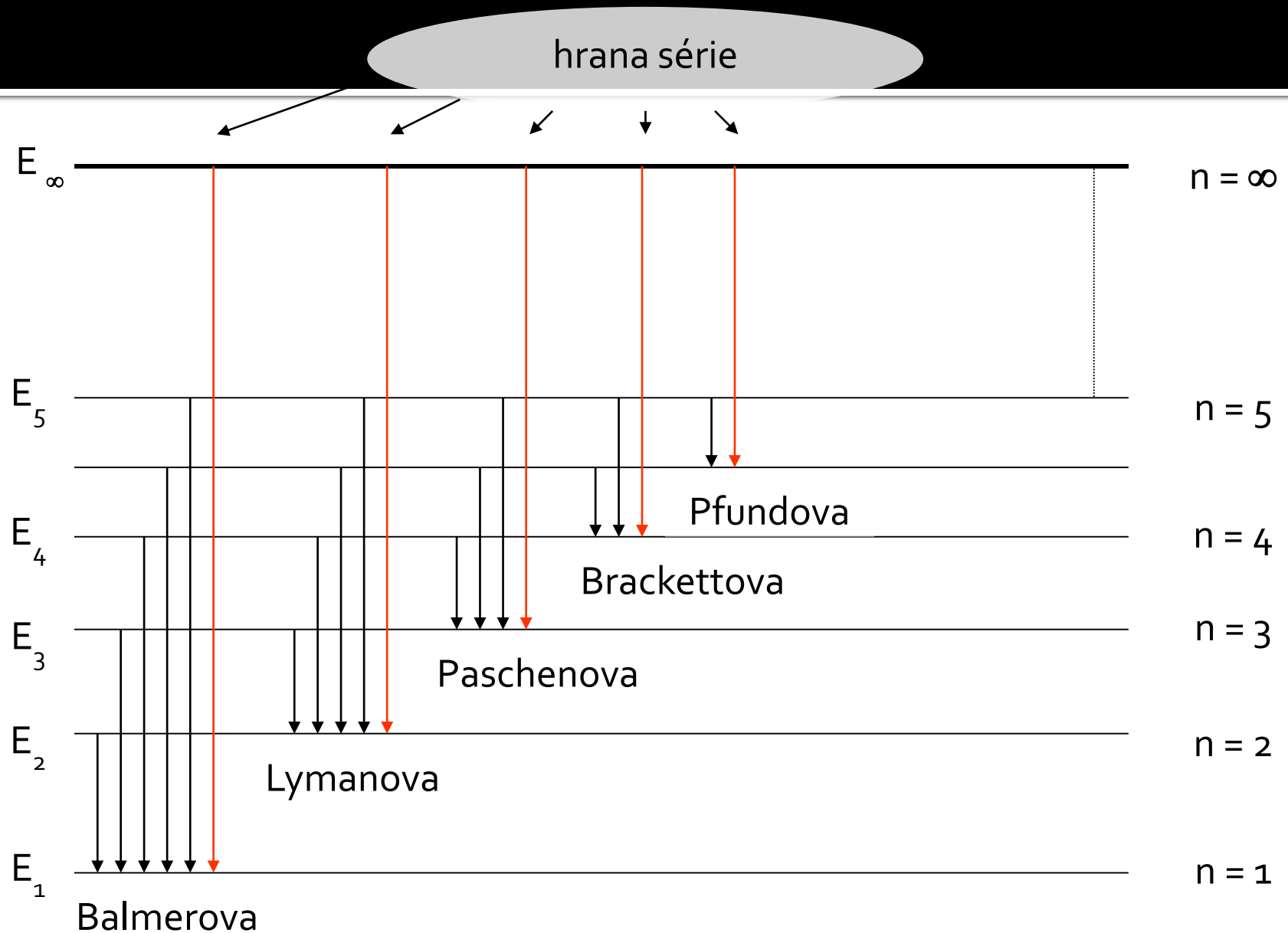
$$f = R_f \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Rydbergova frekvence

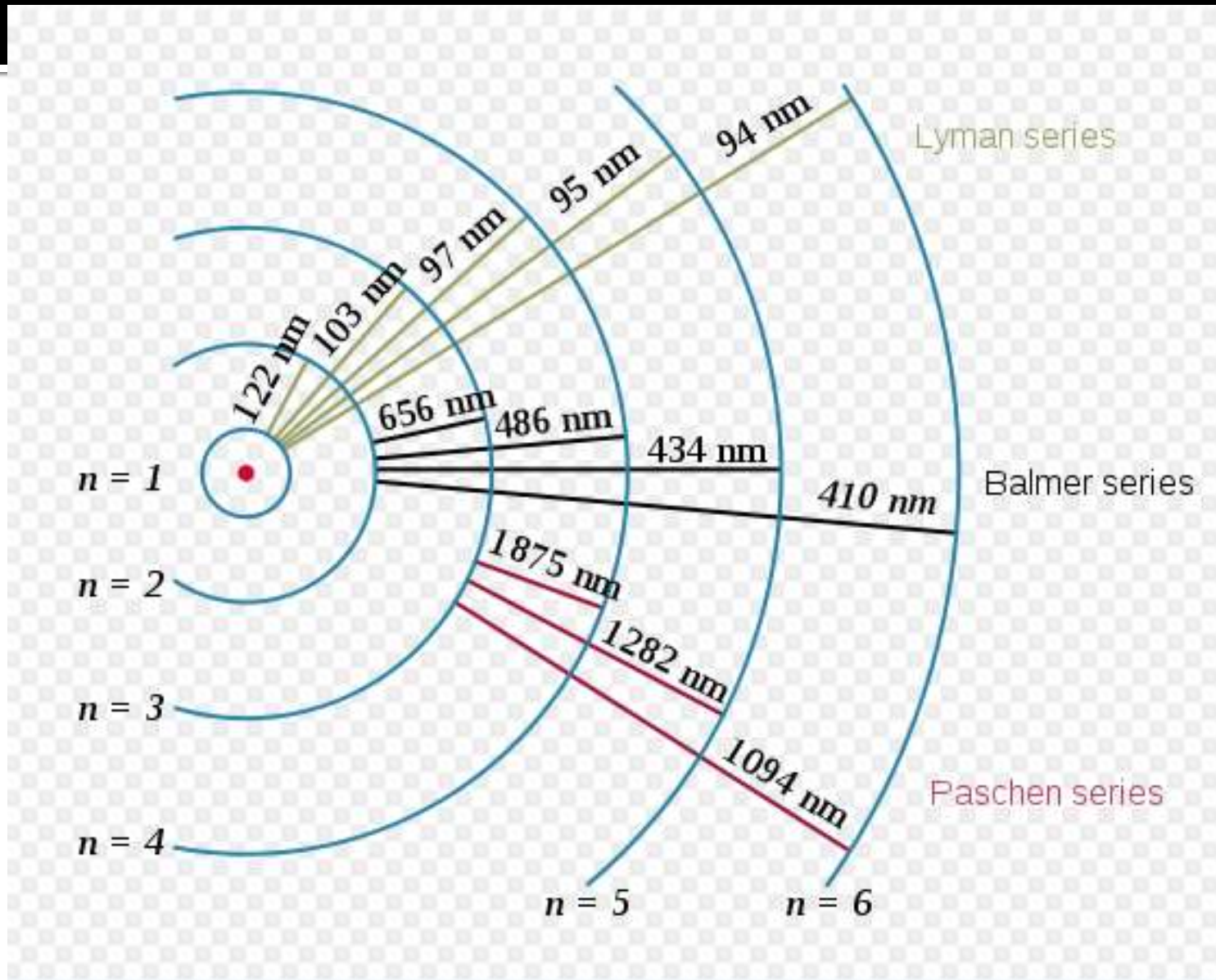
Vyzařování energie z atomu vodíku

- Všechny fotony přecházející z n -té na m -tou energetickou hladinu pak vytvoří ve spektru jednu spektrální čáru.
- Všechny spektrální čáry, které vzniknou přechodem elektronu na první (resp. druhou, třetí, čtvrtou...) hladinu patří do stejné série.

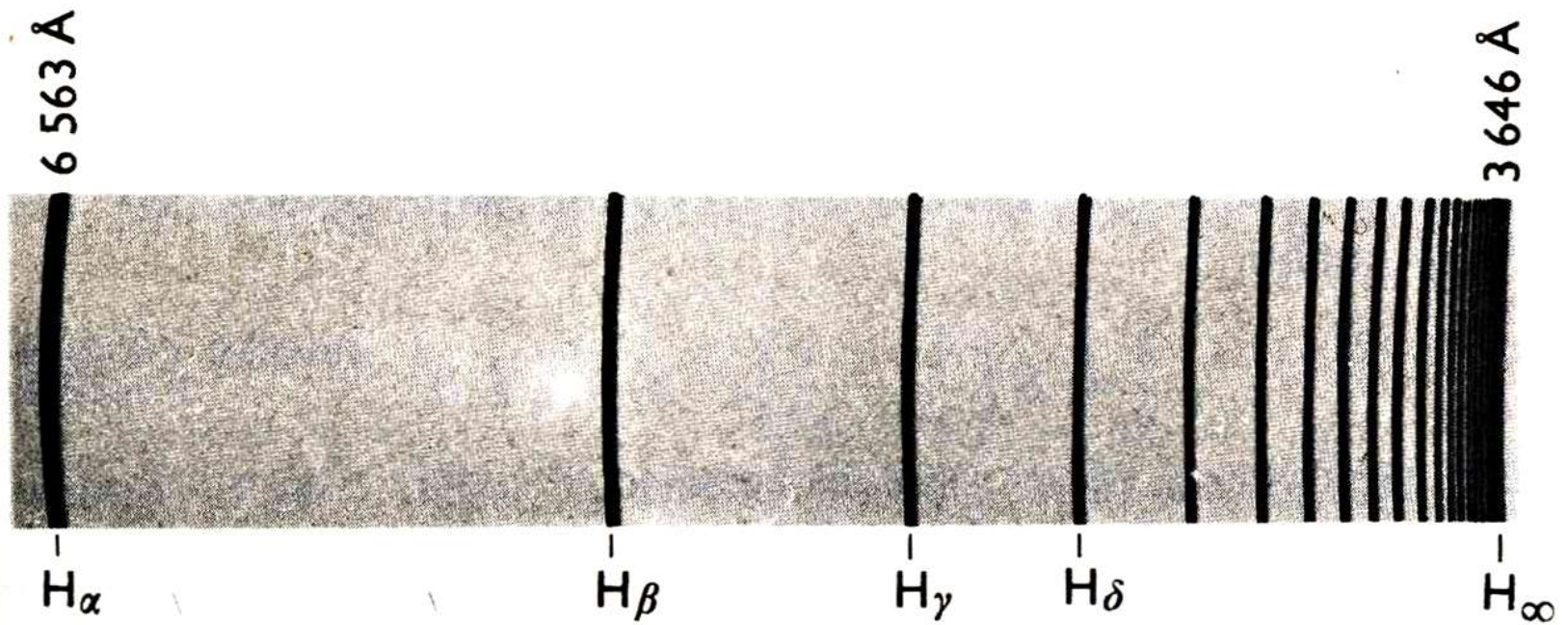
spektrální série atomu H



spektrální série atomu H

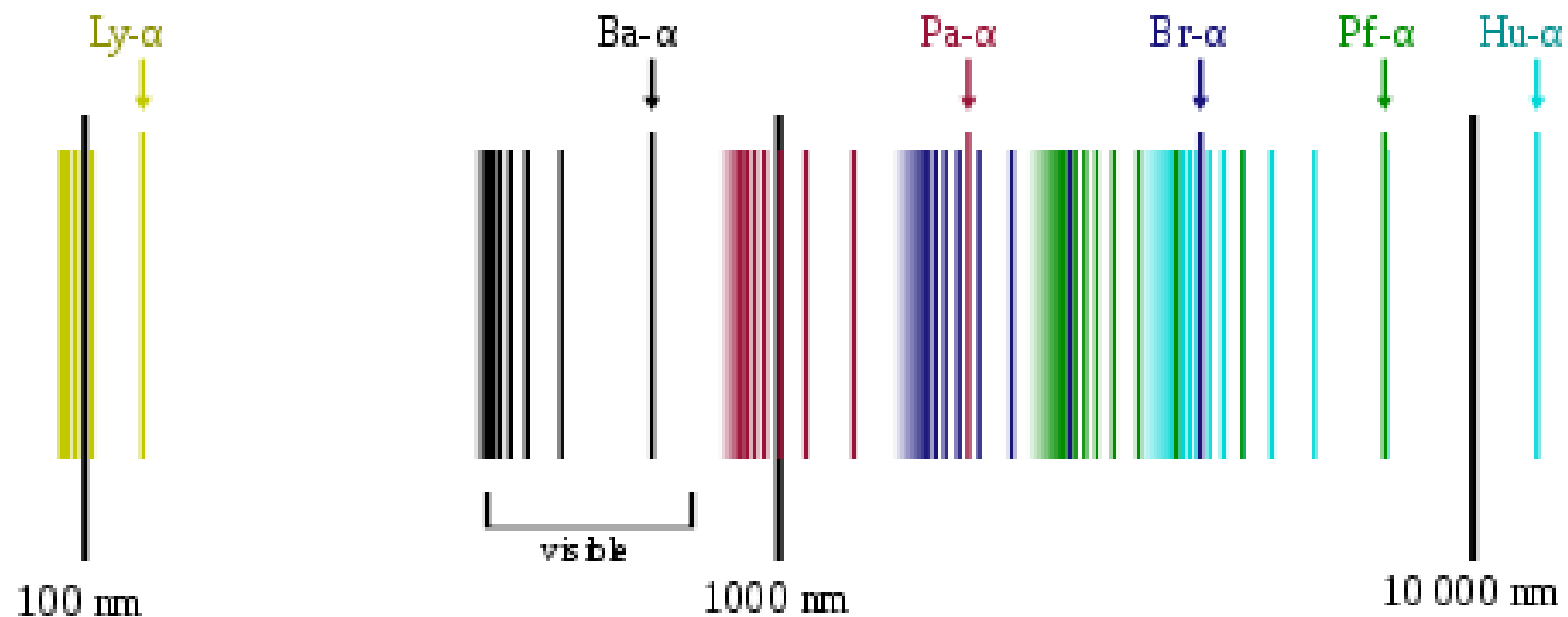


Balmerova série atomu H



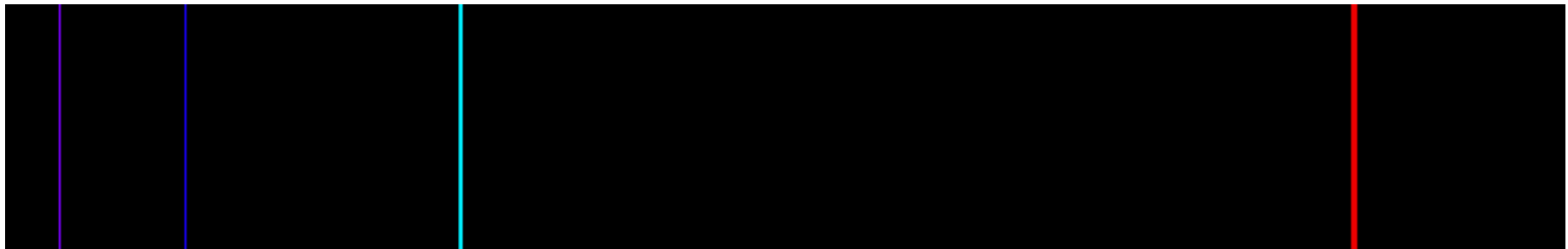
Obr. 6.5 Balmerova série vodíku.

spektrální série atomu H



spektrální série atomu H

- Do viditelné oblasti pak spadají pouze čtyři čáry z Balmerovy série.



H_{δ}

H_{γ}

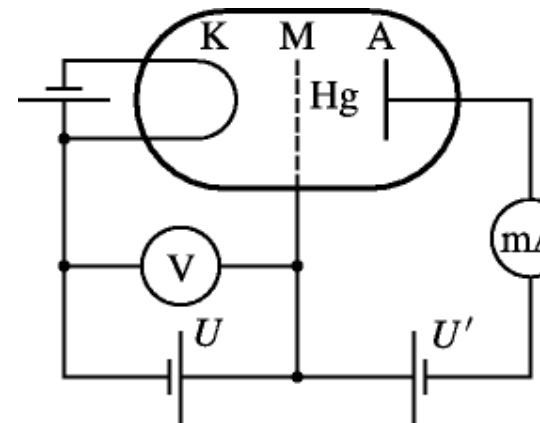
H_{β}

H_{α}

Transition of n	3→2	4→2	5→2	6→2	7→2	8→2	9→2	$\infty \rightarrow 2$
Name	H- α	H- β	H- γ	H- δ	H- ϵ	H- ζ	H- η	
Wavelength (nm) ^[2]	656.3	486.1	434.1	410.2	397.0	388.9	383.5	364.6
Color	Red	Blue-green	Violet	Violet	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)

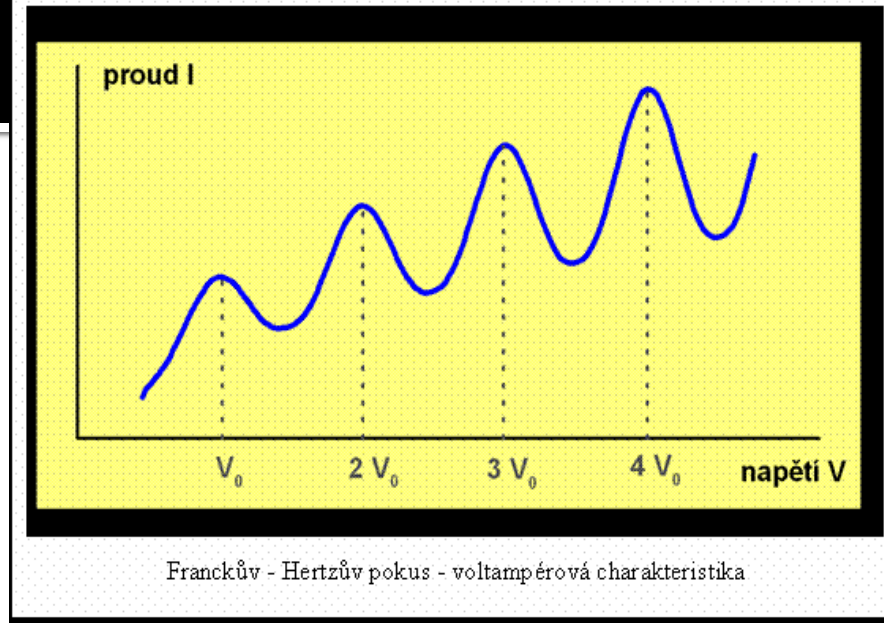
Potvrzení kvantování – Franck – Hertzův pokus (1914)

- VA charakteristika plynu procházejícího triodou
- Triodu T plnili Franck a Hertz parami různých prvků.
- Ze žhavené katody K vystupují elektrony a jsou unášeny elektrickým polem ke kladně nabitě mřížce M.
- Potenciálový rozdíl mezi katodou a mřížkou označme symbolem V .
- Na své cestě se elektrony srážejí s atomy par vyplňujících vnitřní prostor triody, přičemž tyto srážky mohou být jak pružné, tak i nepružné.
- Slabé brzdicí napětí mezi mřížkou a anodou dále způsobí, že jen elektrony s jistou minimální kinetickou energií dopadnou na anodu a přispějí k proudu tekoucímu galvanometrem A. Elektrony s menší kinetickou energií ke katodě nedospějí a jsou odvedeny mřížkovou větví obvodu.
- [PDF](#)



Výsledky Frank – Hertzova pokusu

- Výsledek experimentu je na první pohled v rámci klasické fyziky nepochopitelný. Podle ní bychom totiž ve shodě s Ohmovým zákonem očekávali spíše monotónní závislost proudu na mřížkovém napětí. Výrazná lokální maxima, ekvidistantně rozložená na experimentální křivce, jsou pochopitelná pouze, přijmeme-li Bohrovu představu o kvantování vnitřní energie atomů.
- Elektrony vystupující z katody jsou, jak již bylo uvedeno výše, urychlovány elektrickým polem mezi katodou a mřížkou. Kdyby nebylo srážek s atomy par v triodě, pohybovaly by se rovnoměrně zrychleně s energií rostoucí lineárně se vzdáleností od katody. Zmíněné srážky ovšem charakter pohybu elektronů ovlivňují. Pružné srážky mění jeho směr. Vzhledem k velkému rozdílu mezi hmotnostmi elektronů a atomů nedochází během nich k téměř žádným změnám kinetické energie elektronů. Naopak ve srážce nepružné, která je doprovázena excitací srážejícího se atomu, se kinetická energie elektronů zmenšuje. A zde je třeba hledat původ oněch záhadných maxim a minim na voltampérových charakteristikách změřených Franckem a Hertzem.



Pro páry rtuti zjistili Franck a Hertz, že první pokles proudu nastává pro mřížkové napětí $V = 4,9 \text{ V}$. Energetický rozdíl mezi základní a první excitovanou hladinou v atomu rtuti by tedy měl být $4,9 \text{ eV}$. V dokonalém souladu s tímto závěrem pozorujeme v absorpčním spektru rtuťových par spektrální čáru o vlnové délce $253,6 \text{ nm}$, již odpovídá energii fotonu rovná právě oněm $4,9 \text{ eV}$.

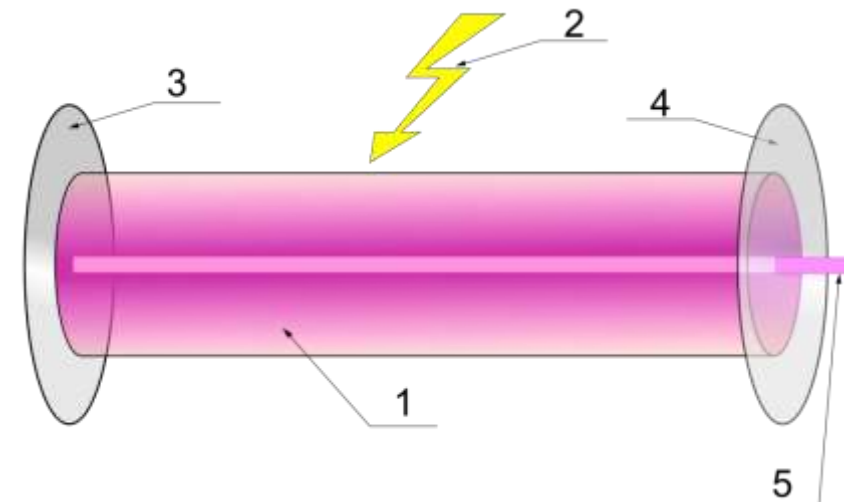
Laser

- Aplikace energetických hladin
- Vlastnosti laseru
 - koherentní paprsek (téměř – difrakční jev způsobuje malou divergenci paprsku)
 - monochromatický paprsek (obsahující pouze jednu vlnovou délku nebo barvu)
 - polarizovaný paprsek (popisuje jev, kdy se vektor elektrické složky v rovině kolmé na pohyb stáčí)
 - Výkon od několika mW až po kW
 - Účinnost přeměny energie na světlo 20%

Laser - princip

- Vhodné látce dodáme určitý typ energie (čerpání optické, elektrické, chemické, termodynamické, jaderné)
- Látka absorbuje energii, v některých atomech dochází k excitaci
- Ve chvíli, kdy převládne počet excitovaných částic nad počtem částic v nižším energetickém stavu, dochází populační inverzi – vzniká aktivní prostředí
- V tomto stavu látkou procházející optický paprsek produkuje víc stimulované emise než stimulované absorpce, tak je paprsek zesílen
- Vzhledem k tomu, že v aktivním prostředí dochází také k spontánní emisi fotonů, tak tyto fotony můžou zastat funkci vstupní energie. Docílí se to použitím odrazových zrcadel.

1. Aktivní prostředí (obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů)
2. Dodávaná energie
3. Zrcadlo - odrazivost 100%
4. Zrcadlo - odrazivost 99%
5. Výstupní laserový paprsek

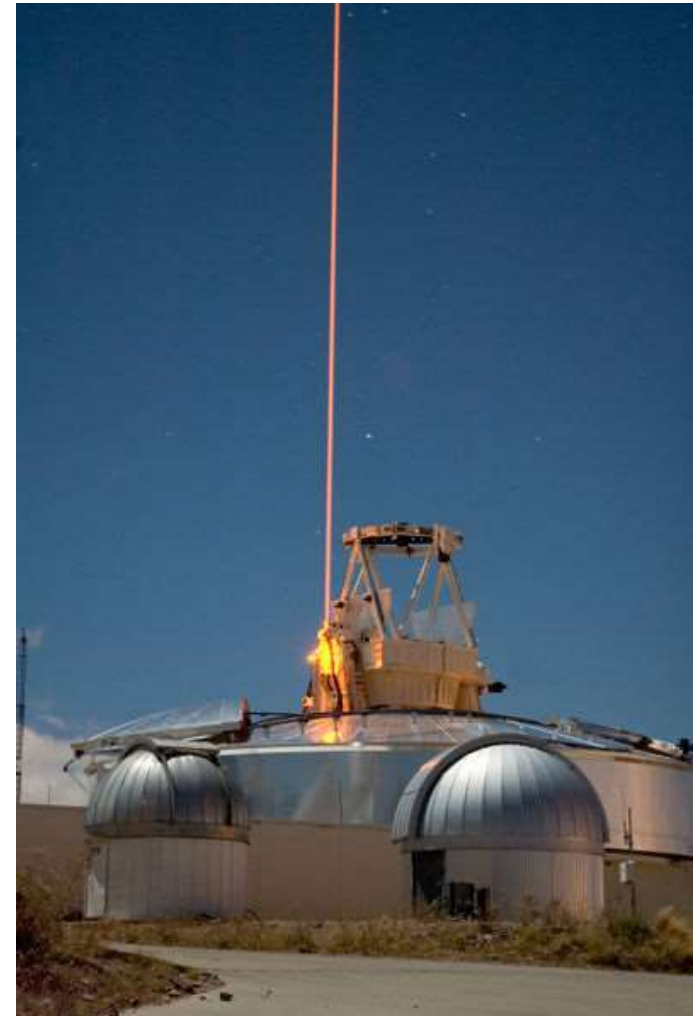


Simulace

- Laser
- Porovnání světla různých zdrojů
- Tříhladinový laser
- Argon-iontový laser

Některé aplikace laseru

- Vědecké (spektroskopie, měření vesmírných vzdáleností, fotochemie, nukleární fúze, LIDAR)
- Vojenské (SDI, laserové vidění, rušení satelitů, značkování cíle)
- Lékařství (Kosmetické operace, operace očí, laserový skalpel, zubní zákroky, akupunktura)
- Průmyslové/ Komerční (Řezání a úprava materiálu, čtení čárových kódů, laserová ukazovátka, holografie, optická komunikace)
- Spotřebitelské (laserové tiskárny, optické přehrávače CD a DVD, světelné projekce)



LIDAR, The Starfire Optical Range

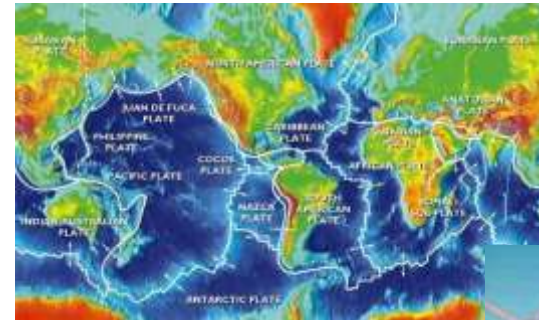
Aplikace laseru - oční lékařství

- Diagnostika (změřit sílu zánětu, rychlost proudění krve v cévách apod.) – skenovací oftalmoskop, biometrie oka, tomografie povrchu rohovky ad.
- Biostimulační léčba – červeným světlem He-Ne laseru urychluje tkáňové procesy
- Fotodynamická léčba – selektivně se zvýší citlivost cílové tkáně na laserové záření, které potom tuto tkáň zničí
- Fototermická léčba – laserová energie se přemění na teplo a vznikne zánět a poté pevná jizva – argonový nebo Nd-YAG laser – léčba následků cukrovky a zánětu
- Fotodyzruptivní léčba – vysokoenergetický Nd-YAG laser vytvoří v tkáni plazmatický výbuch. Tím se dají rozbít jemné oční struktury – léčba zeleného zákalu (náhrada ultrazvuku)
- Fotoablace – excimetrové lasery tvarují povrch rohovky – vytváří se trvalá kontaktní čočka – léčba krátkozrakosti a astigmatismu (metody LASIK, LASEK)



Využití laseru

- Meteorologie a ekologie
 - LIDAR výška oblačnosti
 - turbulence
 - znečišťující látky v ovzduší
- Geofyzika
 - Z měření polohy družic lze určit polohu místa na Zemi – pohyb litosférických desek
- Obranný laserový mobilní systém 50-70 kW



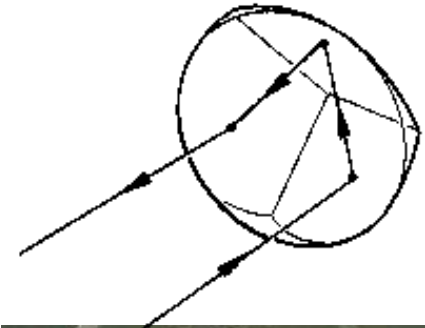
Využití laseru

■ Koutové odražeče

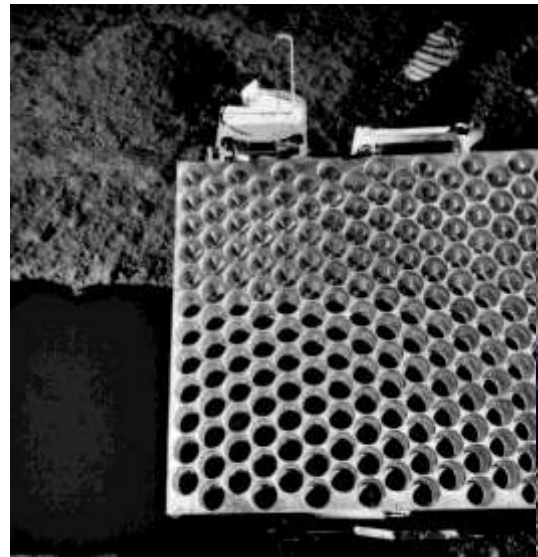
- Vzdálenost k odražeči na Měsíci se dá měřit s centimetrovou přesností

■ Zlepšování přesnosti

- Vzdálenost k Měsíci byla určena:
 - 1969 – 40 cm
 - 1985 – 18 cm
 - dnes – 5 mm



1969, Apollo 11



1971, Apollo 14



Navíc:

Kvantová teorie pro vodík

- Bohužel Schrödingerova rovnice je již pro atom H nepříjemně komplikovaná.

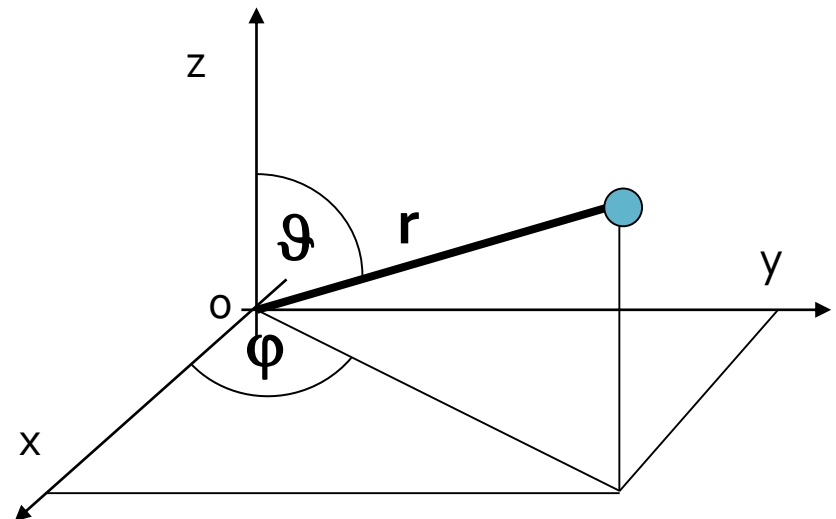
$$\sin^2 \vartheta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \sin \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{2mr^2 \sin^2 \vartheta}{\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + E \right) \psi = 0$$

polární soustava souřadnic:

r ... vzdálenost od o

φ ... „zeměpisná délka“

ϑ ... „zeměpisná šířka“



Kvantová teorie pro vodík

- Ukazuje se, že rovnice má řešení pouze tehdy, je-li energie elektronu kvantována, a to Bohrovým vztahem:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

n ... hlavní kvantové číslo

Další kvantované veličiny

- A energie není jediná veličina, která nemůže nabývat jakékoli hodnoty.
 - Když elektron krouží kolem jádra, je v něm „určité množství rotačního pohybu“ – budeme říkat momentu hybnosti (L).
 - moment hybnosti je vektor
 - Velikost vektoru momentu hybnosti je kvantována vedlejším kvantovým číslem (l).

$$L = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar$$

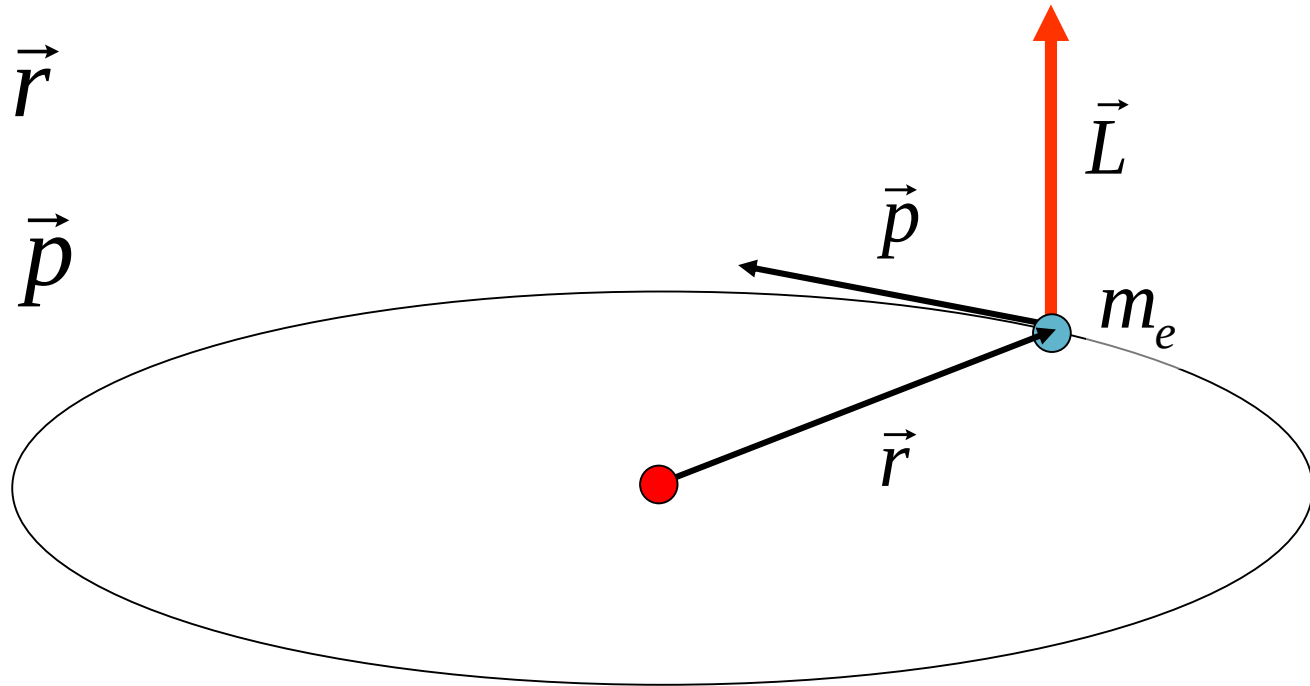
$$l = 0, 1, 2, \dots (n-1) \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

1	označení
0	s
1	p
2	d
3	f

moment hybnosti elektronu

$$\vec{L} \perp \vec{r}$$

$$\vec{L} \perp \vec{p}$$



$$L = r \cdot \underset{\substack{\text{hybnost}}}{p} = r m_e v$$

Magnetické kvantové číslo

- Moment hybnosti má rovněž směr. Vložíme-li atom do magnetického pole, tak tento směr již nemůže být libovolný.
- Jsou-li magnetické indukční čáry tohoto pole rovnoběžné např. s osou z , tak je z -ová souřadnice momentu hybnosti kvantována magnetickým kvantovým číslem (m).

$$L_z = m \cdot \hbar \quad -l \leq m \leq l$$

Spin

- Elektron se rovněž chová tak, jakoby rotoval. Má tedy vlastní moment hybnosti – spin (S).
$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hbar$$
- Jeho z-ová složka je pak kvantována spinovým magnetickým číslem (m_s), které může nabývat pouze dvou hodnot:
$$S_z = m_s \cdot \hbar \quad m_s = \pm \frac{1}{2}$$
- Důkaz – [Stern – Gerlachův experiment](#).

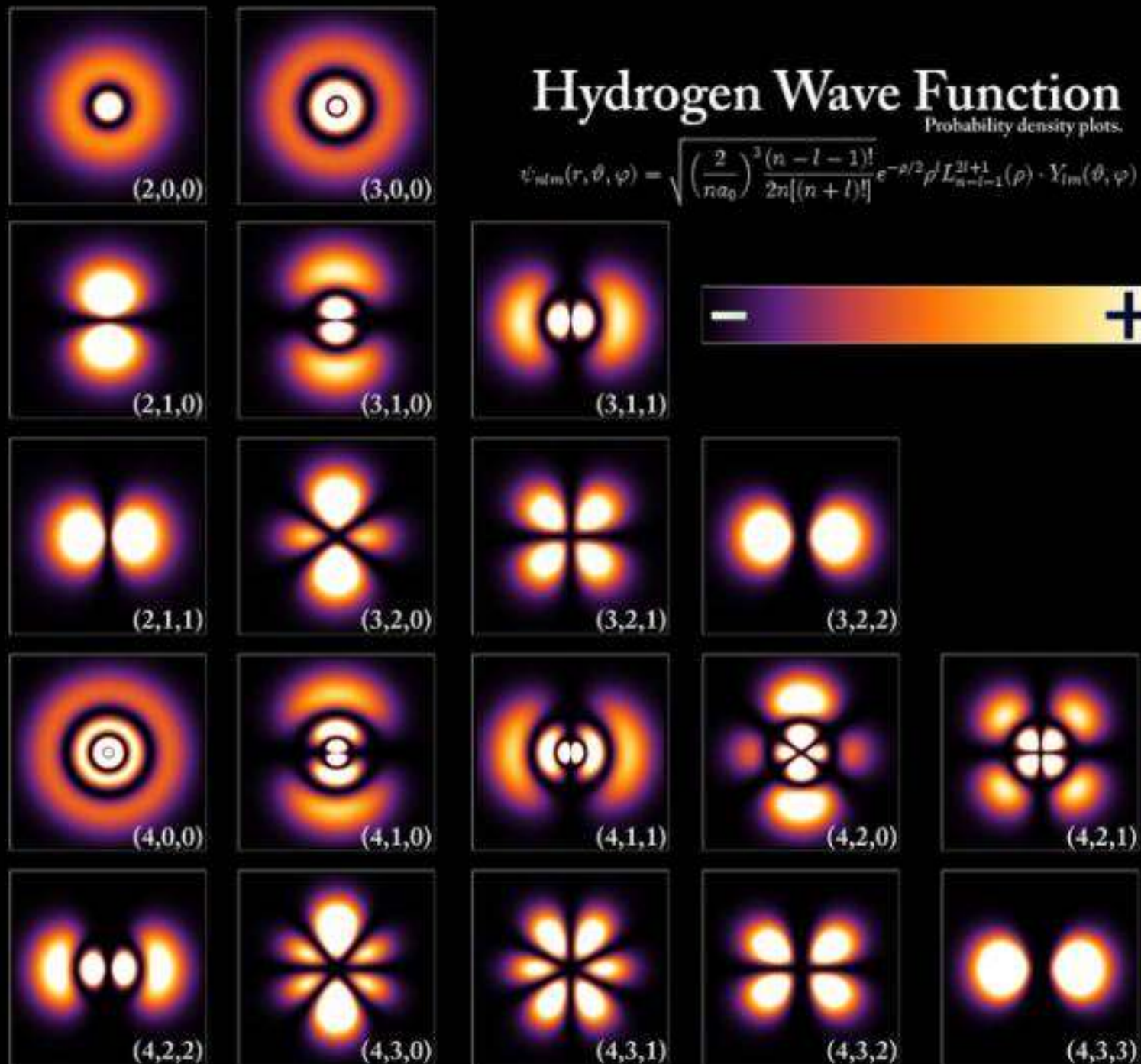
Poloha elektronu

- Jestliže nyní Schrödingerovu rovnici vyřešíme, získáme vlnovou funkci ψ , z níž pak již můžeme určit prapost výskytu elektronu v okolí daného místa ($p=|\psi|^2dV$).
- Znázorněním rozložení této pravděpodobnosti jsou tzv. orbitaly.

Hydrogen Wave Function

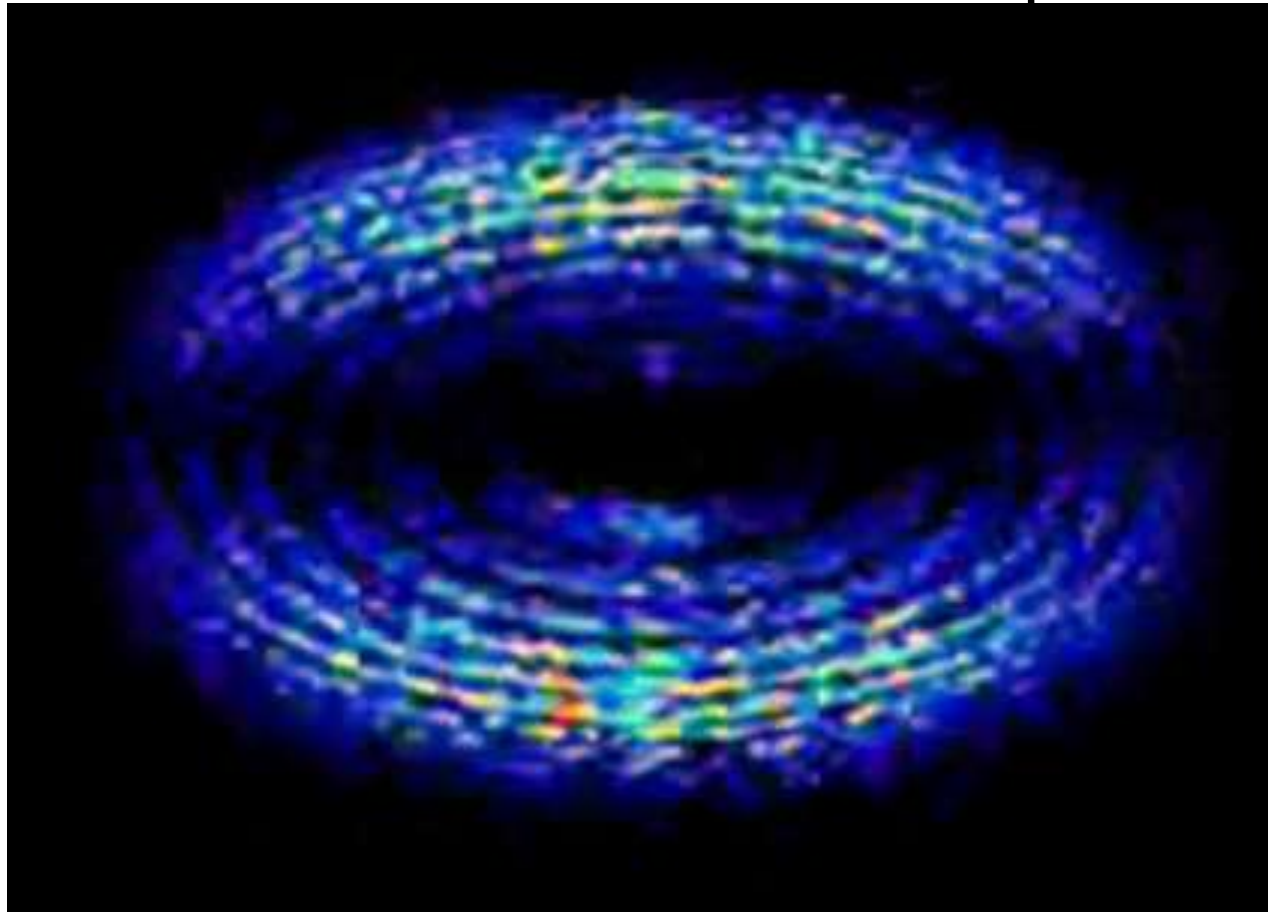
Probability density plots.

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



Důkaz

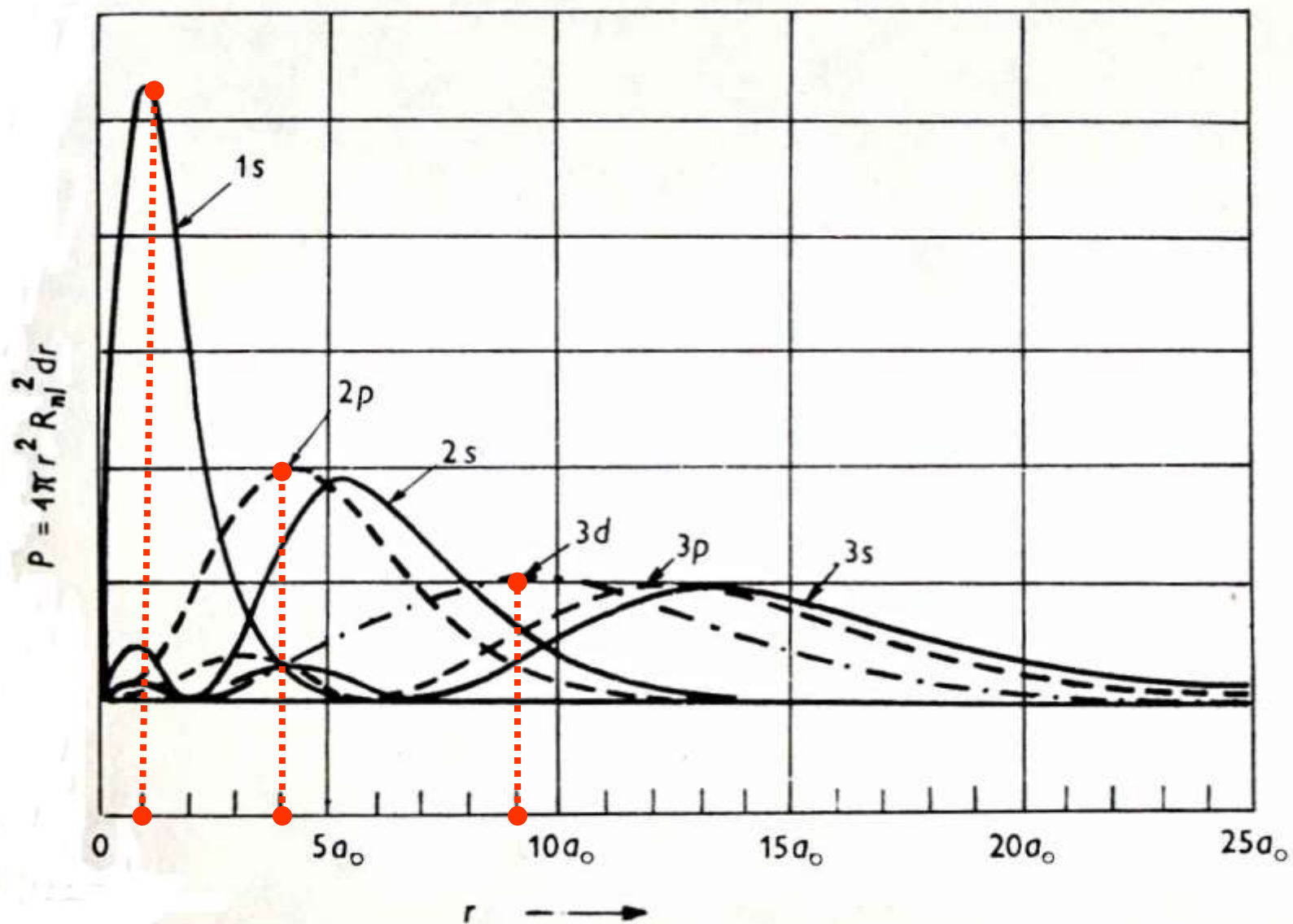
- A že to není pouhá teorie dokládá tento snímek pohybujícího se elektronu snímaného po dobu 10^{-18} s.



Vzdálenost od jádra

- Ukazuje se, že N. Bohr měl částečně pravdu i v další věci: nejpravděpodobnější vzdálenosti elektronu od jádra ve stavu 1s, 2p ($m=\pm 1$), 3d ($m=\pm 2$) a 4f ($m=\pm 3$) splňují jeho kvantovací podmínkou:

$$r_n = n^2 a_0 \quad \begin{array}{l} n = 1, 2, 3, 4 \\ a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \end{array}$$



Pravděpodobnost výskytu elektronu vodíkového atomu ve vzdálenosti r až $r + dr$ od jádra